

金属粉末射出成形品のウエルド生成メカニズム解明と品質向上に関する研究

研究報告者 長田 稔子

プロフィール



最終学歴 平成 18 年 3 月
九州大学大学院 工学府
知能機械システム専攻 博士後期課程 修了

専門分野 粉体加工

学 位 博士(工学)

所属団体 首都大学東京 システムデザイン学部
機械システム工学科

役 職 名 特任助教

今後の抱負

金属粉末をバインダと混合し、射出成形し焼結する金属粉末射出成形 (MIM : Metal Injection Molding) は 1970 年代に開発された技術で、溶製材の切削加工では作製が困難であるような小型の複雑形状部品の量産が実現されています。一方で、基礎研究の部分では、まだやるべきことがたくさんあると感じていますし、従来のステンレス鋼だけではなく、新たな材料への挑戦もしていかなければなりません。また最近ではバインダージェットによる 3D プリンタでの金属部品の造形も実現可能になってきています。バインダを含んだ金属部品の脱脂・焼結工程は MIM と同等と考えられておりますが、環境負荷の少ないバインダの選択や、焼結体の寸法精度の向上など、3D プリンタにも MIM にも、同様に取組みたいといけなことがたくさんあります。助成を頂いた際には九州大学にいましたが、その後、首都大学東京に移りました。研究の環境は変わりましたが、今後も継続してこれらの研究に取り組んでいきたいと考えております。

1. はじめに

金属粉末射出成形 (Metal Injection Molding, MIM) は、粉末冶金とプラスチックの射出成形を組み合わせた金属部品作製技術である。図1にMIMプロセスの概要を示す。金属粉末と複数の樹脂バインダを混合、混練した原料を金型中に射出成形して形状を付与、その後バインダの除去 (脱脂)、金属粉末の焼結という過程で最終製品を得る。材料の自由度が高いうえ、形状の自由度も高く、ネットシェイプで大量生産することが可能な工業的にも有用なプロセスである。

MIM では射出成形を行うため、プラスチック射出成形時と同様の不良現象が生じる。例えば、金属粉末を高い割合で含む原料を射出するために、流動性に優れたパラフィンワックスを多く添加すると、金型内でジェットイングを起こしやすい。また、成形後のフローマークや ウェルドラインなどは、バインダ樹脂の脱脂、焼結後に、金属のみの焼結体になるにもかかわらず残存するため、外観不良となり、最悪の場合には変形や破損を起こすこともある (図2, 3)。

そこで本研究では、焼結体にフローマークやウェルドラインが残存するメカニズムについての詳細を解明し、MIM製品の品質向上を図ることを目的とする。MIM材料のための最適金型設計について検討を行うとともに、射出成形プロセス中の樹脂流動のモニタリングを行い、成形体、焼結体の特性に及ぼす影響を観察・分析により明らかにする。

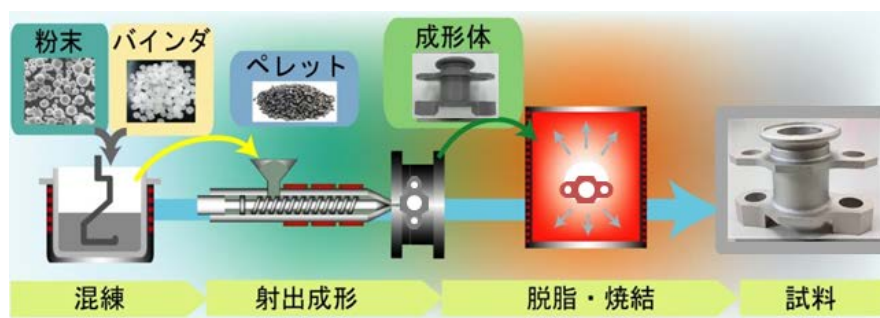


図1 MIMプロセスの概要



図2 成形体および焼結体
(ゲート位置およびウェルドラインに矢印を付した)



図3 焼結体不良品の例，ウエルド部での破損，変形

2. 実験方法

水アトマイズ法により作製された平均粒径 $4.46\mu\text{m}$ の SUS316L 粉末を使用した。粉末の SEM 写真を図4に示す。この粉末は球状で、粒径が揃っている。粉末およびワックス系バインダを 55:45 の体積比で混練、粉碎し、射出成形の原料とした。

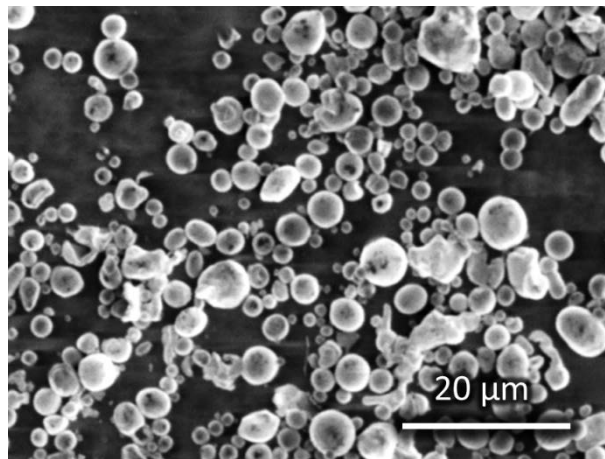


図4 SUS316L 粉末

射出成形の金型は、ウエルドの導入が可能であり機械的特性や寸法の評価が容易な形状にするよう検討を行った。作製した金型の写真を図5に示す。試験片はダンベル型の引張試験片と、リング型の試験片とし、ランナーに切り替えをつけることで任意の形状の成形を行えるようにした。引張試験片は試験片両端部にゲートを設けたことで試験片中央部にウエルドを導入できるが、ランナー部の切り替えにより、ウエルドを作らない成形も可能とした。さらに、ゲートはつかみ部の端部および側面に設け、これも切り替えられるようにした。引張試験片およびリング型試験片とも、ウエルドの発生する試験片中央部とその手前に型内圧力・温度センサーを設置し、成形中の材料の流動をモニタリングできるようにした。さらに、射出成形では製品を取り出す際には、一般にピンを利用して製品を押し出すが、MIMの成形体は脆く崩れやすいため、試験片形状で押し出し、離型ができるようにした。射出成形は型締力 50 トンの射出成形機（ファナック、 α -S50iA）を用いて行った。

得られた成形体は、ヘプタン気相中での溶媒脱脂を行った後、真空脱脂焼結炉（島津産機システムズ、VHSgr20/20/20）を用いて、600℃での加熱脱脂および1350℃、2hでの焼結を行った。得られた成形体および焼結体は、密度測定や寸法評価、観察と、引張試験を行った。

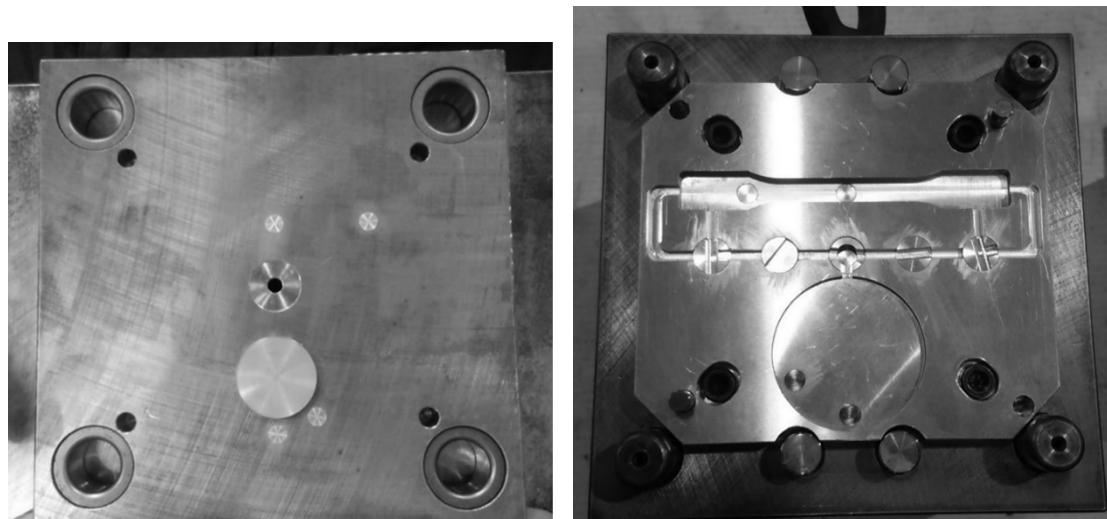


図5 新規作製した金型

3. 実験結果および考察

3.1 リング型試験片

図6にリング型試験片の成形体および焼結体の外観写真を示す。射出成形時の条件として、射出速度を変えて作製したサンプルで、ゲートと反対側にウエルドができるが、成形体ではいずれの条件においても明らかなウエルドは確認できなかった。焼結体には圧力センサー痕の右側に薄くウエルドラインのようなものが見えているようにも見えるが、外観不良となるようなウエルドラインは得られなかった。

図7に試験片の様々な位置での寸法を示す。ゲートから時計回りに4か所の測定を行った。射出速度が速い方が試験片の幅、厚みともに大きく、ゲート位置で試験片幅が減少した。

焼結体の相対密度は、射出速度 10 mm/s のもので 89.3 %、30 mm/s で 95.9 %であった。射出速度が速い方が試験片寸法は大きかったが、密度も十分上がることがわかった。

図8にウエルド部の表面のSEM写真および断面の光学顕微鏡写真を示す。試験片表面には結晶粒が観察され、ウエルドによる結晶の異常成長や変形などは見られなかった。断面写真にはいずれの条件でもウエルド部に並んだ気孔が見られた。試験片の外観からは確認できなかったが、内部にはウエルドによる欠陥が生じていたことがわかった。







成形体		
焼結体		
ウエルド 付近		
	10 mm/s	30 mm/s

図6 リング型試験片の外観写真

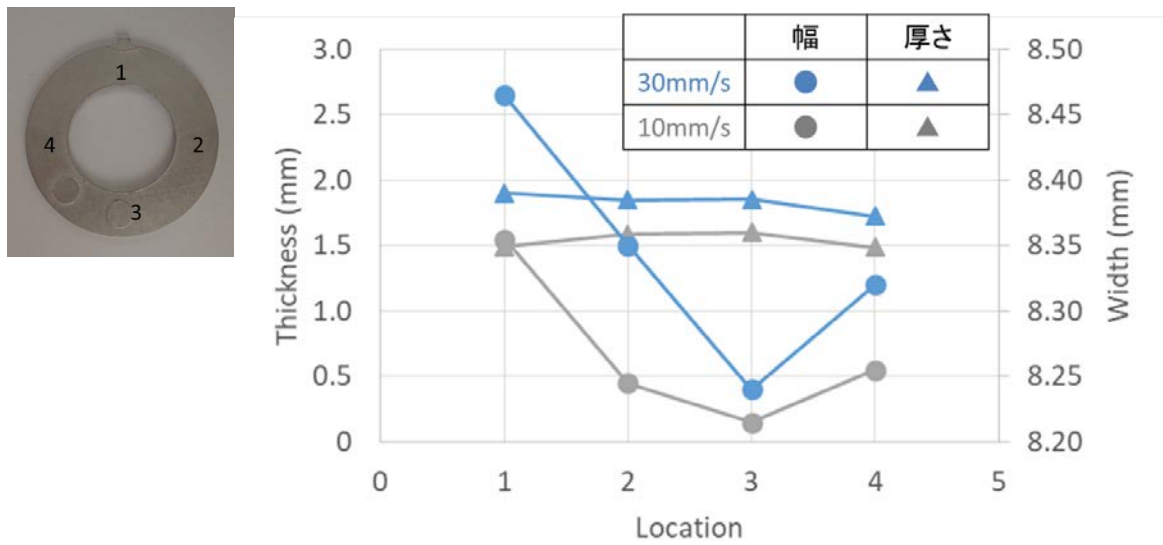


図7 焼結体寸法

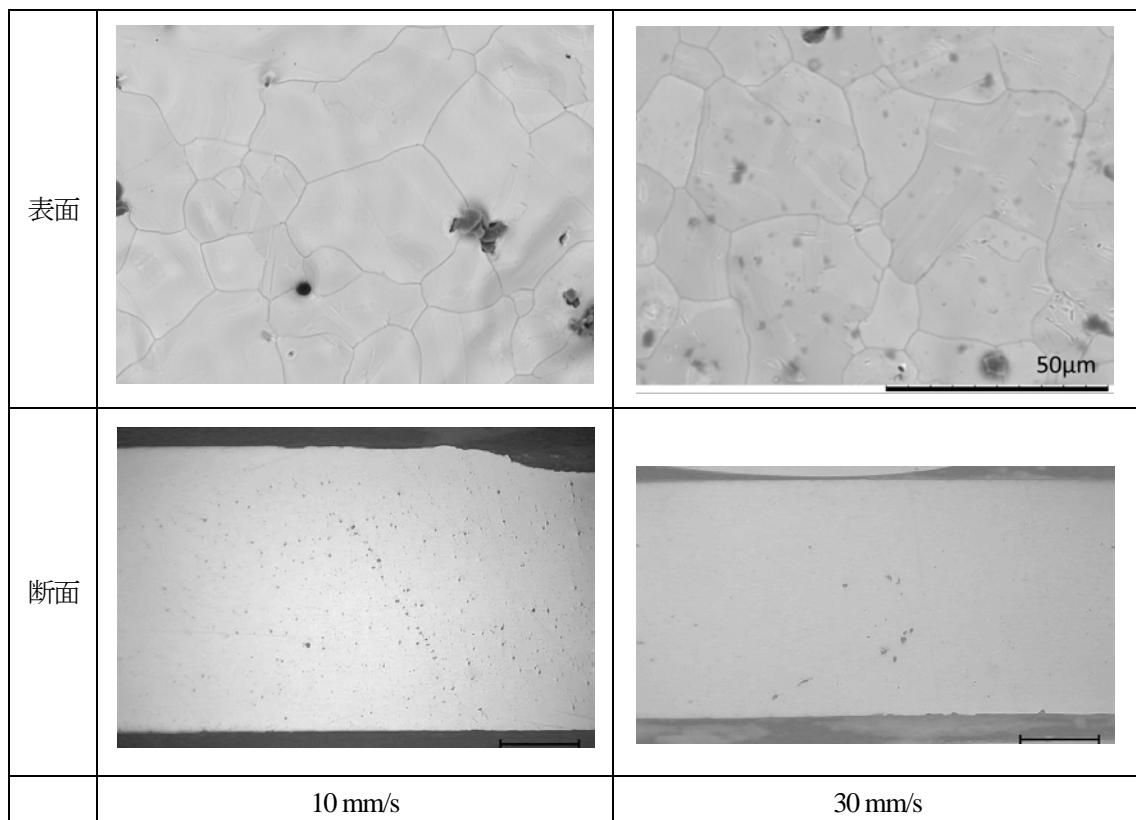


図8 試験片表面および断面写真

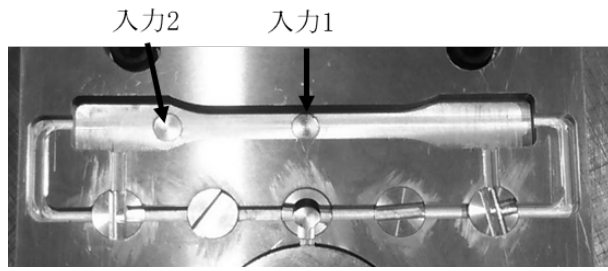
3.2 ダンベル型試験片

図9にダンベル型試験片の射出成形時に型内圧力、温度とスクリュ位置、速度をモニタリングした結果を示す。入力1が試験片中央のウエルド部、入力2がゲートからウエルド部までの間のセンサーの値である。スクリュは速度制御で動いた後、圧力制御に切り替わる。樹脂の流動とともに型内の温度が上昇する。ゲートに近い入力2の圧力が立ち上がり、遅れてすぐに入力1の圧力も立ち上がる。保圧はかかっているが、型内圧力はすぐに徐々に低下した。射出速度の違いにより型内圧力のピーク値が異なっていた。図10に型内圧力のピーク値を示す。射出速度が速い方が型内圧力は高く、ウエルド部にかけての圧力低下量が少ないことがわかった。このことから型内圧力のモニタリングによりウエルドの生成状態を制御できる可能性があると考えられる。

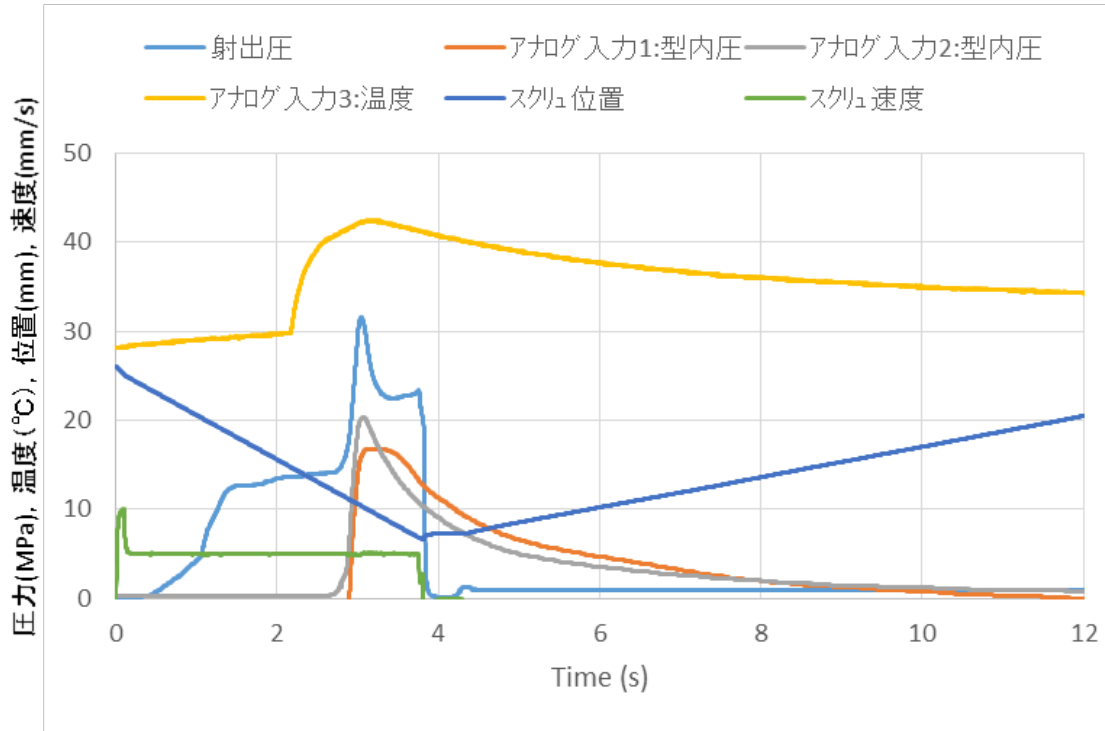
図11に得られた試験片の外観写真を示す。試験片両端部から樹脂を流動させたため、試験片中央部にウエルドが生成すると考えたが、成形体および焼結体ともに、目視可能な明確なウエルドラインは確認できなかった。

得られた焼結体の相対密度は、射出速度10mm/sで87.9%、30mm/sで95.8%であった。この傾向はリング型試験片と同様であった。試験片の幅および厚さを測定し、得られた収縮率の結果を図12に示す。試験片平行部では幅の収縮量は一定であったが、中央部での厚さ方向の収縮が小さく、中央部では材料が合流することにより厚さが増え、収縮が少なくなったことがうかがえる。

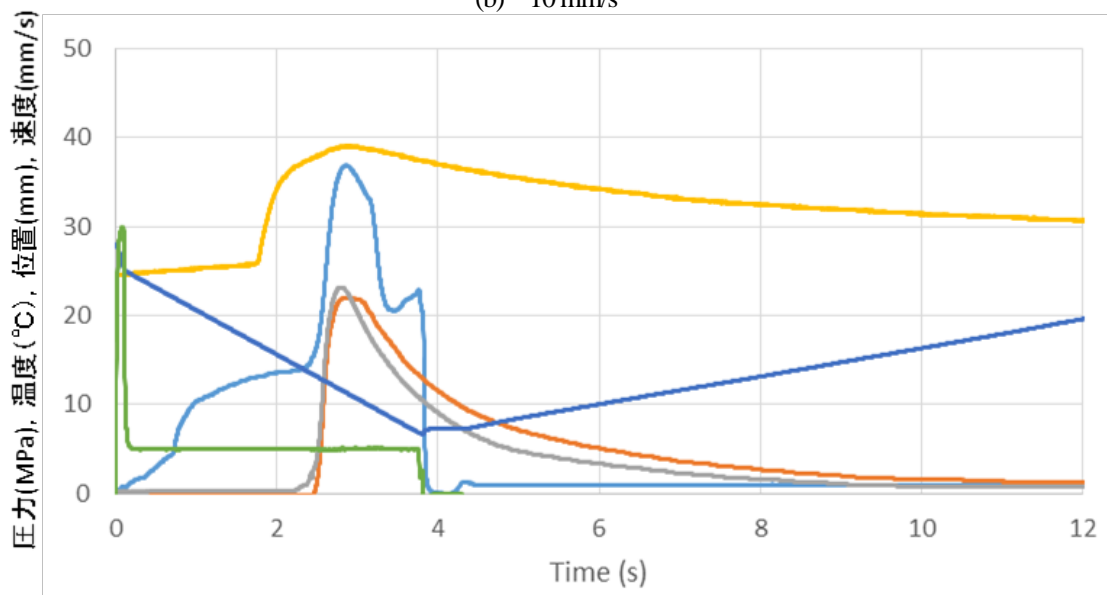
引張試験の結果得られた試験片の破断状況を図13に示す。試験片はほとんどがつかみ部と試験片中央部の間で壊れ、ウエルド部で破壊したものは1本であった。引張試験の結果得られた諸特性を表1に示す。相対密度が95%以上を示した30mm/sの試験片では強度は粉末冶金工業会の規格値を上回る値を示したが、破断伸びはいずれも小さかった。ウエルド部で破断したものは、弾性率、強度、破断伸びとも、ウエルド以外で破断したものとほとんど変わらなかった。破断部のSEM観察結果を図13に示す。ウエルド以外で破断が見られたものは、破断面に大きな欠陥が見られ、これが破壊の起点となり、伸びの低下の原因となったと考えられる。ウエルド部で破断したものは、破壊の起点となるような大きな欠陥は見られず、破断面にはディンプルが見られ、他の試験片より伸びがやや大きかったことが示された。樹脂の試験片の場合、一般にウエルド部が弱くウエルドから破壊することが多いが、MIMの場合は焼結体密度や成形不良の影響が大きく、健全な試験片であればウエルド部から破壊することもあるということがわかった。



(a) センサー位置



(b) 10 mm/s



(c) 30 mm/s

図9 射出成形モニタリング

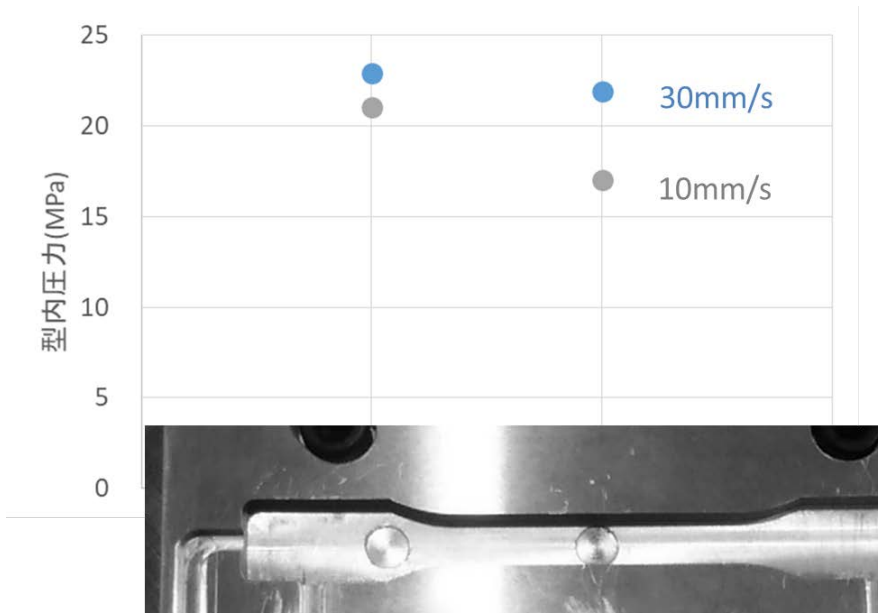


図10 型内圧力

成形体		
焼結体		
	10 mm/s	30 mm/s

図11 試験片外観



図12 収縮率

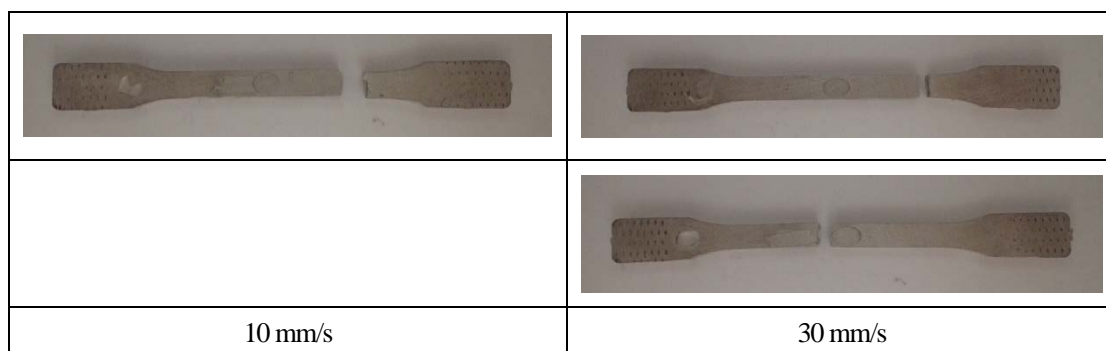


図 13 破断様相

表 1 引張試験結果

射出速度	弾性率(GPa)	強度(MPa)	破断伸び(%)
10 mm/s	151.0	435.5	15.0
30 mm/s	144.5	506.5	31.7
ウエルド部	136.3	458.0	33.3
粉末冶金工業会 MIM 規格		450 以上	40 以上

4. まとめ

今回の材料、金型、成形条件では、目視可能な顕著なフローマークおよびウエルドラインは得られなかった。ダンベルの型内圧力測定の結果、射出速度が速い場合はウエルド部の圧力の低下が小さかった。射出速度が速いものは、95%以上の高い焼結体密度を示した。ダンベルの引張試験の結果、ウエルド部で破壊したものは1本のみで、焼結体密度および成形不良の影響のほうが大きいことがわかった。材料および金型設計、射出成形時のパラメータ制御により、ウエルドライン等の成形不良を抑制可能である。

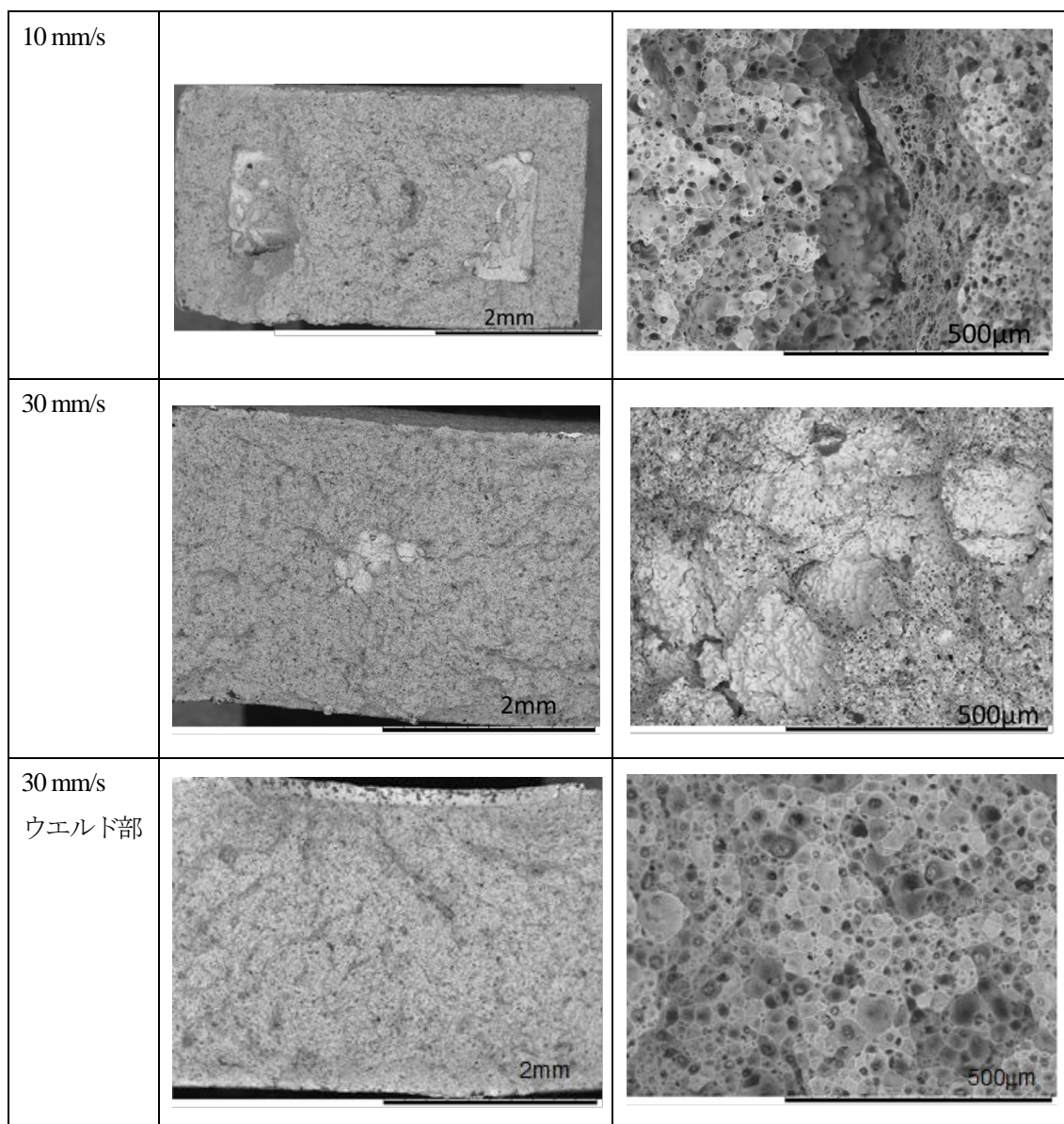


図 14 破断部の SEM 写真

謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されたことを記し、感謝の意を表します。